

DÜŞÜK DÖNGÜSEL YÜK ALTINDAKİ ALÜMİNYUM ALAŞIMIN PEKLEŞME PARAMETRELERİ ÜZERİNE ANALİZ

Eray Arslan¹, Milan Zigo² ve Gerhard Kepplinger³

¹Viyana Teknik Üniversitesi, Viyana

^{2,3}Magna-Steyr, Graz

ABSTRACT

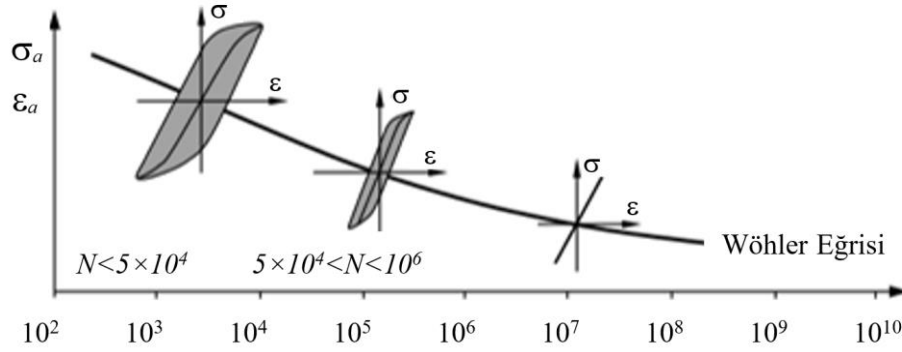
To use in the further fatigue life calculations, hardening parameters of aluminum alloy EN AW-5754 H22 which is subjected to very low cyclic load and frequently used in the vehicle components. In this process, experimental data is obtained, the imperfections in the test data are examined and eliminated, suitable hardening model is selected, and the calibration is performed. During the determination of the parameters, different methods are examined and finite element simulation results are obtained. Results are compared and the most suitable models and parameters are specified.

ÖZET

Çok düşük döngüsel yük altında çalışan ve otomobil parçalarında sıklıkla kullanılan EN AW-5754 H22 alüminyum alaşımının ileri yorulma analizlerinde kullanılmak üzere pekleşme parametreleri belirlenmiştir. Bu aşamada, deneysel veriler elde edilmiş, deneysel verilerdeki kusurlar tespit edilerek düzeltilmiş, uygun pekleşme modeli belirlenmiş ve datanın modele göre kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Parametrelerin belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmış ve sonlu elemanlar simülasyonu sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak en uygun yöntemin ve parametrelerin belirlenmesi sağlanmıştır.

GİRİŞ

Farklı doğrultularda ve büyüklüklerde yüklere maruz kalan otomobil parçalarının yorulma ömürlerinin ve yapısal mukavemetlerinin araştırılması otomotiv sektöründe büyük öneme sahiptir. Otomobil parçalarının, bütün yapının ve yolcu güvenliğinin artırılması için bu unsurların dikkatlice analiz edilmesi ve tasarımların bu analiz sonuçlarına dayandırılması önemli bir husustur. Parçaların yorulma analizi; yük koşullarına, yapının geometrisine, kullanılan malzeme özelliklerine ve üretim tekniklerine direk olarak bağlıdır [1]. Buradaki yük koşulları genellikle farklı sınıflara ayrılabilen uygulama yükü ile ilişkilidir. Otomobil parçalarının maruz kaldığı en kritik ve tehlikeli yüklerden bir tanesi, yorulmaya sebep olacak farklı genlik ve frekanstaki döngüsel yüklerdir. Bunlara genellikle yorulma yükleri adı verilir ve temelde sabit genlikli ve değişken genlikli olmak üzere ikiye ayrılır [2]. Sabit genlikteki yorulma yüklerinin sınıflandırılması için Wöhler eğrisi olarak bilinen gerilme-döngü sayısı eğrisi temel alınabilir. Bu eğrinin bir örneği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Örnek Wöhler eğrisi [2]

Şekil 1’de de gösterildiği gibi döngü sayısının değişimi ile yapının deformasyon davranışı arasında bir ilişki bulunmaktadır. Düşük döngü sayısı ile yorulmaya maruz kalan malzemede elastik-plastik (ya da pekleşme) davranışın incelenmesi gerekirken, yüksek döngü sayısına maruz kalan eleman için sadece elastik davranışını incelemek yeterli gözükmemektedir [2]. Bu iki deformasyon davranışının teori ve uygulamada birbirinden tamamiyle farklı olduğu düşünülürse, döngü sayısına bağlı olarak eğriyi üç temel bölümde incelemek önem arz etmektedir. Döngü sayısının 5×10^4 ’den küçük olduğu bölgeye düşük döngü bölgesi, 5×10^4 ile 10^6 arasında olduğu bölgeye sonlu döngü bölgesi ve 10^6 ’dan büyük olduğu bölgeye ise yüksek döngü bölgesi adı verilir [2]. Buna ilave olarak, birim şekil değiştirme bileşeninin çok küçük olduğu durumlarda çok küçük döngü bölgesi de oluşur ve bu bölgenin yorulma davranışı da diğer bölgelerden farklı değerlendirilmelidir [4]. Diğer bölgelerden farklı olarak, pekleşmenin gerçekleştiği düşük döngülü yorulma analizleri malzemenin pekleşme davranışlarının incelenmesi ile başlamalıdır [5]. Öncelikle kullanılacak malzemelerin pekleşme davranışını tarif eden en uygun modelin belirlenmesi ve bu modele (ya da modellere) uygun pekleşme parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir [6]. Bu tip problemler genellikle döngüsel plastisite olarak adlandırılır [6].

Bu çalışmada, otomobil üreticileri tarafından sıkça kullanılan ve döngüsel plastisite durumuna maruz kalan EN AW-5754 H22 alüminyum alaşımının ileri yorulma analizinde kullanılmak üzere pekleşme davranışı incelenmiştir. Bu davranışı tarif eden pekleşme modeli belirlenmiş, uygun deney sonuçları yardımıyla pekleşme parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelerin kullanıldığı sonlu elemanlar modellerinin sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılmış, model sonuçlarının mükemmelleştirilmesi ve analiz aşamasında karşılaşılan zorlukların giderilmesi için gerekli araştırmalar yapılmıştır.

Çalışma üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak malzeme numuneleri kullanılarak, eksenel doğrultuda döngüsel çekme-basma deneyi gerçekleştirilmiştir ve gerilme-şekil değiştirme büyüklükleri tespit edilmiştir. İkinci aşamada, malzeme için uygun pekleşme modelinin ve pekleşme parametrelerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada, parametreler kullanılarak geliştirilen sonlu elemanlar modeli yardımıyla deney simüle edilmiştir. Bu üç aşamanın detayları aşağıda sunulmuştur.

DENEYİN HAZIRLANMASI VE DENEY SONUÇLARININ ELDE EDİLMESİ

İlk olarak malzeme numuneleri kullanılarak, eksenel doğrultuda döngüsel çekme-basma deneyi gerçekleştirilmiştir ve gerilme-şekil değiştirme dağılımı tespit edilmiştir. Numune

malzemesi olarak EN AW-5754 H22 alüminyum alaşımı seçilmiştir. Malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’de ve malzemeye ait bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

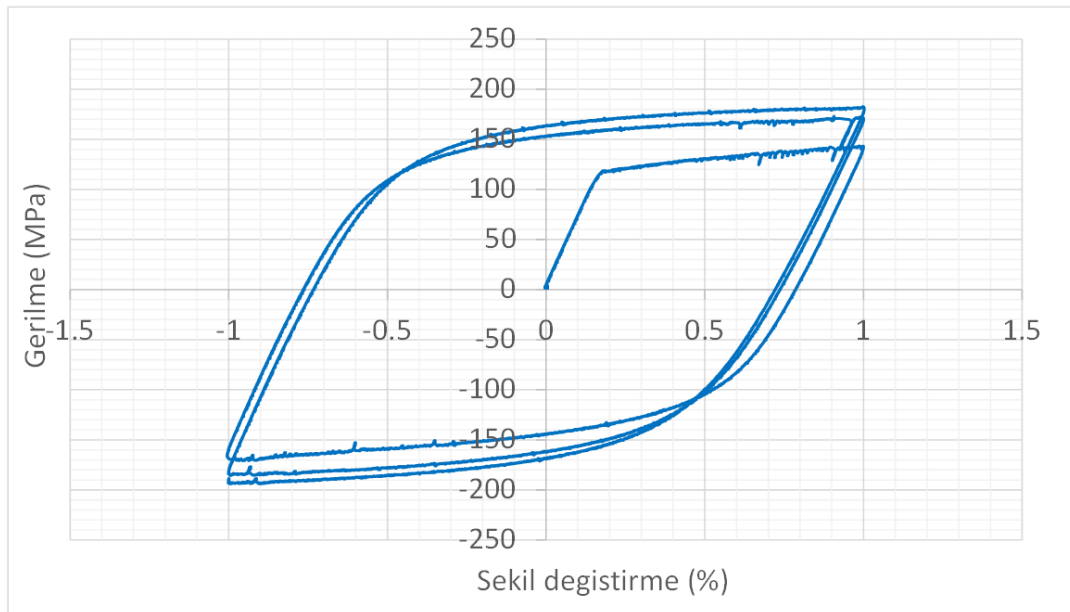
Çizelge 1. AW-5754 H22 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu [10]

Element	Mg	Mn+Cr	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	AL	Diğer
%	2.6-3.6	0.1-0.6	0-0.5	0-0.4	0-0.4	0-0.3	0-0.2	0-0.15	0-0-1	Balans	0-0.5

Çizelge 2. AW-5754 H22 alüminyum bazı fiziksel özellikleri [10]

Özellik	Yogunluk	Elastisite modulu	Poisson Oranı
Değer	2.66 g/cm ³	68 GPa	0.33

Deney numunelerinde standart yorulma deney numunesi geometrisi kullanılmıştır [7]. Deney numunelerinin kalınlığı 2 mm, ölçüm yapılan kısmın uzunluğu 10 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Eksenel doğrultuda döngüsel çekme-basma deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil değiştirme kontrollü, % 1’lik şekil değiştirme genliğine sahip toplam 3 döngüden oluşan çekme-basma deneyi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü döngüden itibaren stabil bir döngünün gerçekleşeceği öngörülmüştür ve bu nedenle üçüncü döngü sonunda deney durdurulmuştur. Çok düşük şekil değiştirme genliği uygulanmasına rağmen, olası burkulmaların önlenmesi için burkulma destekleri kullanılmıştır. Çok küçük şekil değiştirme hızı ile gerçekleştirilen deneylerin sonunda, numuneler için gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Numunelerden birine ait deney sonucu Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Bu analizin gerçekleştirilmesinde şekil değiştirme kontrollü bir deneyin gerçekleştirilmesi çok büyük önem arz etmektedir. Şekil 2’de görüldüğü gibi deney sonuçlarında bu detayın sağlandığı gözlenmektedir. Ancak, seçilen yükleme parametreleri nedeniyle datada çok fazla osilasyon bulunmaktadır. Bu osilasyonlar, datanın analizinde bazı zorluklara sebep olacaktır.

UYGUN PEKLEŞME MODELİ VE PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

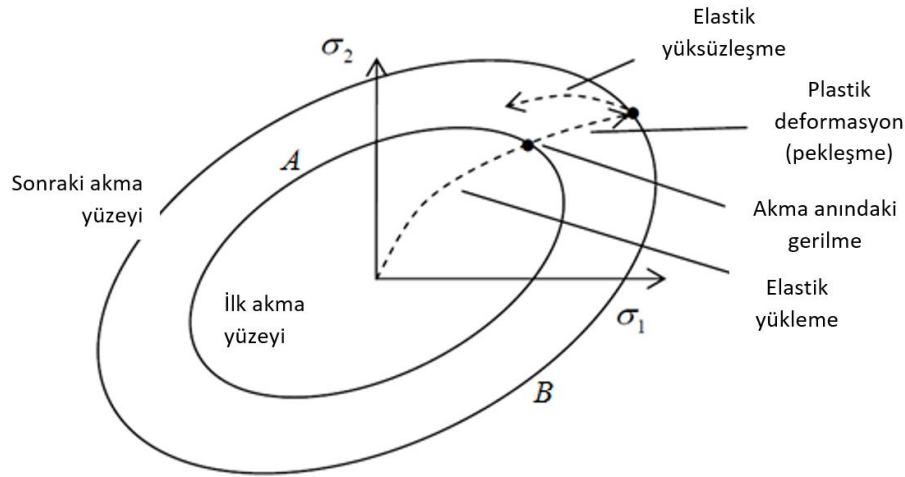
İkinci aşamada, malzeme için uygun pekleşme modelinin ve pekleşme parametrelerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak en uygun pekleşme modeli seçilmeli, bu modele uygun olacak şekilde deney datasının kalibrasyonu gerçekleştirilmeli ve son olarak pekleşme parametreleri hesaplanmalıdır. Yükleme ve malzemelere bağlı olarak farklı pekleşme modelleri seçmek mümkündür [6]. Döngüsel plastisite problemlerinde kullanılabilecek en uygun ve geçerli model bileşik, doğrusal olmayan isotropik ve kinematik pekleşme modelidir [8]. Bu genelleştirilmiş modelde, von Mises akma kriteri temel alınmıştır. Bu kriter gere, akma fonksiyonun (f) sıfır olması durumunda akma gerçekleşir:

$$f = |\sigma - \alpha| - \sigma^0 = 0, \quad (1)$$

Burada σ^0 plastik şekil değıştirmenin sıfır olduğu durum için akma gerilmesini, α ise geri gerilme (back stress) değeri temsil etmektedir. Bu gerilmeler sırasıyla isotropik ve kinematik pekleşme modelleri ile tespit edilebilmektedir [8].

İsotropik Pekleşme Modeli

Bilindiğı gibi, isotropik pekleşme modelinde, asal gerilmelerin oluşturduğu malzemenin akma yüzeyi plastik yükleme ile birlikte büyür. Bu durum, Şekil 3’de anlatıldığı şekilde gerçekleşir [11]. Bu modele göre, ilk akmadan itibaren, yüklemenin devam etmesi halinde akma yüzeyi şekildeki gibi genişler.



Şekil 3. İzotropik pekleşme modelinde akma yüzeyinin değışimi [11]

Bu modelde, akma yüzeyinin değışimi

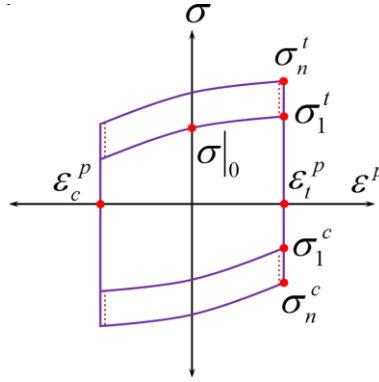
$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty \left(1 - e^{-b_{iso} \epsilon^p}\right) \quad (2)$$

denklemleri ile tanımlanabilir [8]. Burada σ^0 yeni akma gerilmesini, $\sigma|_0$ ilk akma gerilmesini (plastik ve kalıcı şekil değiştirmenin olmadığı, $\varepsilon^p = 0$), ε^p plastik şekil değiştirme bileşenini, ve Q_∞ ile b_{iso} izotropik pekleşme parametrelerini temsil etmektedir. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için her i 'nci döngü için σ_i^0 gerilmesi ve ε_i^p plastik şekil değiştirmesi deney datasında gerçekleştirilen kalibrasyon ile hesaplanabilir. Bu amaçla aşağıdaki denklemler kullanılır [5].

$$\sigma_i^0 = \frac{\sigma_i^t - \sigma_i^c}{2}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_i^p \approx \frac{1}{2}(4i-3) \left(\Delta\varepsilon - \frac{2\sigma_1^t}{E} \right), \quad (4)$$

İzotropik pekleşme için deney datasındaki kalibrasyon ve denklemler (3) ve (4) gösterilen terimlerin tanımları Şekil 4'de verildiği gibidir [5].

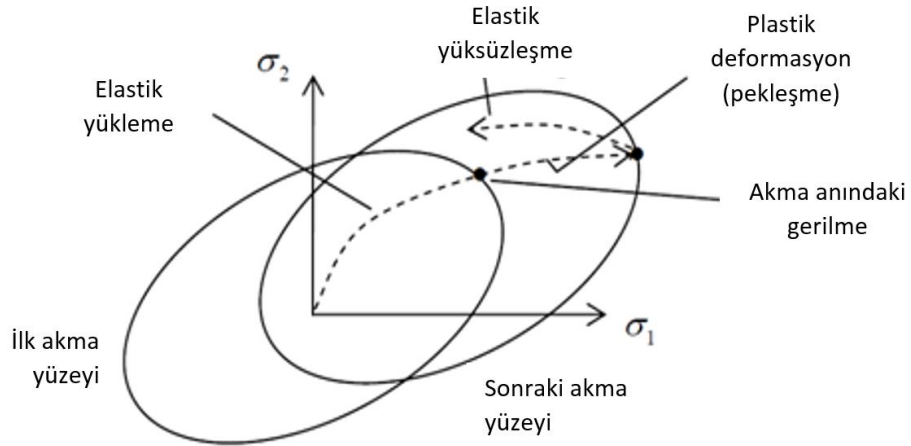


Şekil 4. İzotropik pekleşme kalibrasyonu [5]

Denklemler (2)-(4) kullanılarak, izotropik pekleşme parametreleri Q_∞ ve b_{iso} bir optimizasyon tekniği yardımıyla hesaplanır.

Kinematik Pekleşme Modeli

Kinematik pekleşme modelinde akma yüzeyi izotropik pekleşmede olduğu gibi genişlemez ancak geri gerilme (back stress) etkisiyle kayar [6]. Bu durum Şekil 5'de gösterilmiştir [11].

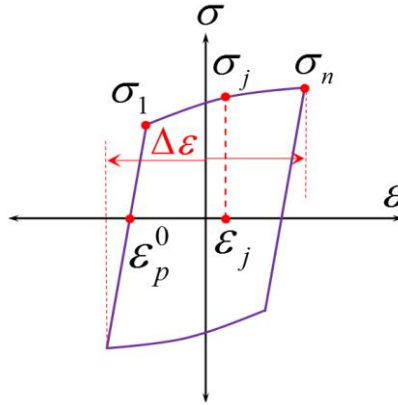


Şekil 5. Kinematik pekleşme modelinde akma yüzeyinin değişimi [11]

Bu pekleşme modeli için

$$\alpha = \frac{C_{kin}}{\gamma} \left(1 - e^{-\gamma \varepsilon^p}\right) + \alpha_1 e^{-\gamma \varepsilon^p} \quad (5)$$

denklemleri tanımlanmıştır. Bu denklemde, α geri gerilme değerini, C_{kin} ve γ kinematik pekleşme parametrelerini temsil etmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi için, statize olmuş, üçüncü döngünün ikinci yarısındaki data kullanılır. Bu döngüdeki kritik değerler Şekil 6'da verilmiştir [5].



Şekil 6. Kinematik pekleşme kalibrasyonu [5]

Şekil 6'da tanımlanan terimler kullanılarak son döngüdeki her data noktası için plastik şekil değiştirme bileşeni ve geri gerilme değerleri tanımlanır. Ardından, denklem (5) ve aşağıdaki iki denklem kullanılarak kinematik pekleşme parametreleri (C_{kin}, γ) bir optimizasyon algoritması kullanılarak hesaplanır. [5].

$$\varepsilon_j^p = \varepsilon_j - \frac{\sigma_j}{E} - \varepsilon_p^0 \quad (6)$$

$$\varepsilon_p^0 = \varepsilon_1 - \frac{\sigma_1}{E} \quad (7)$$

$$\alpha_j = \sigma_j - \frac{\sigma_1 + \sigma_n}{2} \quad (8)$$

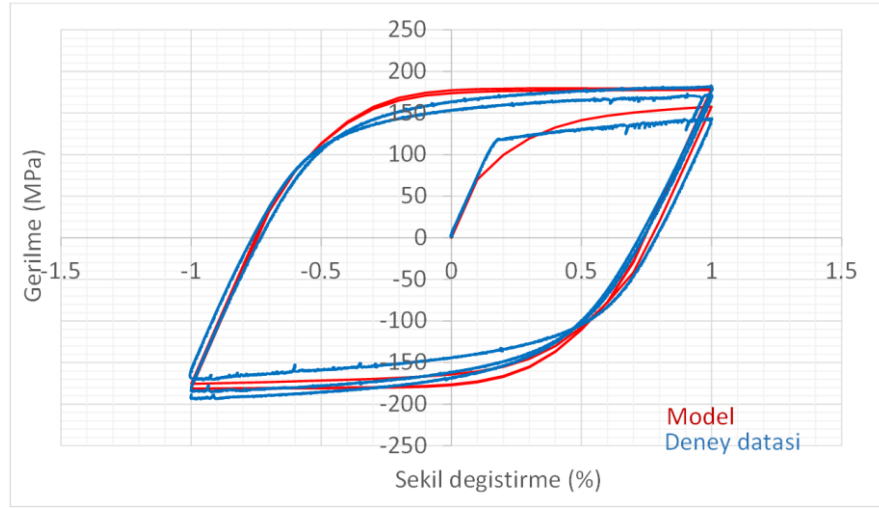
PEKLEŞME PARAMETRELERİ VE SONLU ELEMANLAR MODELİ

Bileşik, doğrusal olmayan isotropik ve kinematik pekleşme modelinde isotropik ve kinematik pekleşme modellerinin etkileri birlikte gözlenabilmektedir ve bu da döngüsel yükleme davranışı için gerekli bir unsurdur. Şekil 2’de sunulan deney datası kullanılarak izotropik ve kinematik pekleşme parametreleri hesaplanmıştır. Bu aşamada, deney datasındaki bazı kusurların giderilmesi ve uygun sonuçların elde edilmesi zor bir süreçtir. Maalesef deneysel veriler ideal teorik verilerden farklı olabilmektedir. Bu aşamada, elastik eğrilerin yükleme ve yüzölçüm bölgelerindeki eğimlerinin teorik olarak aynı olması gerekirken, deney sonuçlarında farklı olması; datada osilasyon gözlenmesi, sınır şekil değiştirme değerlerinin aşılması teoride öngörülme ancak elimizdeki deney sonuçlarında bulunan problemlerdir. Bu problemler, kalibrasyon aşamasının zorlaşmasına ve hatta hatalı sonuçların elde edilmesine sebep olmaktadır. Konuyla ilgili detaylı öneriler, Arslan ve ekibi tarafından kaynak [12]’de sunulmuştur. Bu çalışmada da, bu hataların ve zorlukların giderilmesi için gerekli düzenlemeler ve algoritmalar geliştirilmiştir. Deney datasına bağlı problemlerin giderilmesi için Matlab programları hazırlanmış ve Şekil 2’de verilen deney sonuçları için kullanılan dataya ait pekleşme parametreleri Çizelge 3’deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3. Kalibrasyon sonucu elde edilen İzotropik ve Kinematik pekleşme parametreleri (Yöntem 1)

İzotropik pekleşme		Kinematik pekleşme	
Q_∞	b_{iso}	C_{kin}	γ
41.264	83.278	49428.59	769.79

Bir sonraki aşamada, parametreler kullanılarak geliştirilen sonlu elemanlar modeli yardımıyla deney simüle edilmiştir. Bu aşamada ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Şekil 7’de deney datası ile sonlu elemanlar simülasyon sonucunun karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi sonuçlar birbirine yakındır ancak daha uyumlu olması beklenebilir. Ayrıca, matematiksel modelden elde edilen sonuçlarda fiziksel olarak olmaması gereken durumlar gözlenmektedir. Örneğin çekme bölgesinde şekil değiştirme bileşeni artarken gerilmenin belirli bir değerden sonra sabit kalması, yani pekleşmenin gerçekleşmemesi fiziksel olarak bu malzeme davranışına uygun değildir. Bu nedenle kalibrasyon aşamasında bazı değişikliklerin yapılması öngörülmüş ve kinematik pekleşme modelinin daha da geliştirmesi gerektiğine karar verilmiştir.



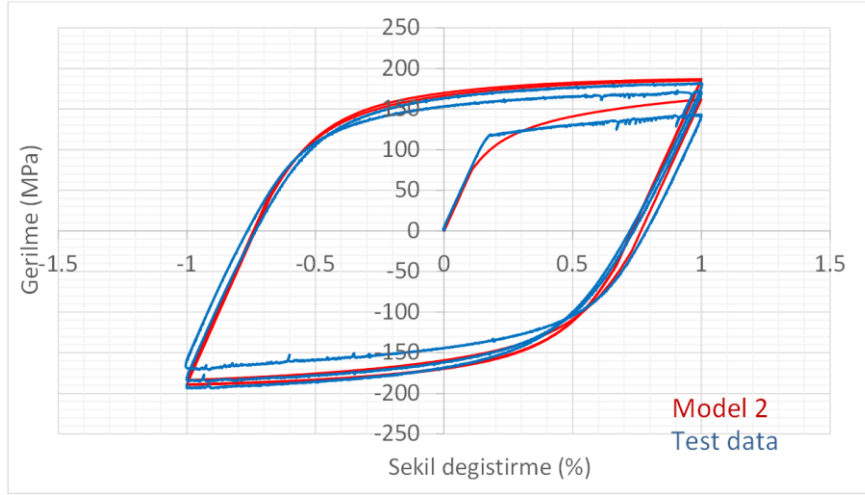
Şekil 7. Deney datası ile sonlu elemanlar simulasyon sonucu (Yöntem 1)

Yukarıda bahsedilen hataların giderilmesi için, yeni kinematik pekleşme modelinde birden fazla geri gerilme değerinin olduğu kabul edilmiştir. Kinematik pekleşme davranışını tarif eden denklem (5), malzemedeki her şekil değiştirme değeri için aynı pekleşme parametresinin kullanılması gerektiğini göstermektedir. Ancak, Çizelge 3’de elde edilen kinematik parametreler, kinematik pekleşme davranışının her bölgesi için uygun sonuç vermemektedir. Bu nedenle, data üç veya daha fazla bölgeye ayrılmalı ve her bölge için farklı kinematik pekleşme parametresi tespit edilmelidir. Bu çalışmada üç farklı geri gerilmenin olacağı varsayılmış ve ilgili parametreler Çizelge 4’de sunulmuştur.

Çizelge 4. Kalibrasyon sonucu elde edilen yeni isotropik ve kinematik pekleşme parametreleri (Yöntem 2)

Isotropic hardening		Kinematic hardening					
Q_{∞}	b_{iso}	$C_{kin,1}$	γ_1	$C_{kin,2}$	γ_2	$C_{kin,3}$	γ_3
41.264	83.278	5669.1	197.29	27949	973.3	70234	3993.9

Çizelge 4’de sunulan parametrelerin kullanıldığı sonlu elemanlar modelinin simülasyon sonuçları Şekil 8’de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi ilk döngülerde sonuç uygun görünmesede, stabilize olmuş döngüde sonuçlar kabul edilebilir düzeydedir.



Şekil 8. Deney datası ile sonlu elemanlar simülasyon sonucu (Yöntem 2)

SONUÇ

Sonuç olarak, bu çalışmada, bir çok kusurun bulunduğu deney sonuçlarının kalibrasyonu için gerekli düzenlemeler yapılmış ve EN AW-5754 H22 alüminyum alaşımı için farklı iki yöntem ile geliştirilen pekleşme parametreleri sunulmuştur. Bu parametrelerin kullanılmasıyla elde edilen sonlu elemanlar modellerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Teorik olarak izlenmesi gereken yolların literatürde çok açık olmasına rağmen, deney datasındaki bazı sorunlara bağlı olarak bir takım düzenlemelerin yapılması çok önemli bir gerekliliktir. Bu düzenlemelerin gerek duyulmasının temel sebepleri şu şekilde sıralanabilir (1) osilasyon nedeniyle Elastisite modülünün kalsik hesaplama prosedürünün hatalı olması; (2) sınır şekil değiştirme değerlerinin aşılması; (3) yükleme ve yüksüzleşme aşamasında elastik bölgelerin eğimlerinin farklı olması; ve (4) birden fazla geri gerilme değerinin kullanması gerekliliği. Bu sorunların giderilmesi, çalışmada sunulan sonuçlarda da görüldüğü gibi daha hassas ve gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] American Society for Metals, Fatigue and Fracture. ASM Handbook, Vol. 19. ASM International, Materials Park, OH (1996).
- [2] Road and Off-Road Vehicle System Dynamics Handbook, Ed. G. Mastinu, M. Plöchl, RC Press, Taylor and Francis, New York (2014).
- [3] J. Draper, Modern Metal Fatigue Analysis. EMAS (2008).
- [4] X. Martinez, S. Oller, L.G. Barbu, A.H. Barbat, A.M.P. de Jesus, Analysis of Ultra Low Cycle Fatigue problems with the Barcelona plastic damage model and a new isotropic hardening law, International Journal of Fatigue, 73 (2015) 132–142.
- [5] K.H. Nip, L. Gardner, C.M. Davies, A.Y. Elghazouli, Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel, Journal of Constructional Steel Research 66 (2010), 96-110.
- [6] R. Halama, J. Sedlák and M.Šofer. Phenomenological Modelling of Cyclic Plasticity, Numerical Modelling, P. Miidla (Ed.), In Tech, DOI:10.5772/35902 (2012).

- [7] American Society for Testing, Materials. ASTM E 606: standard practice for strain controlled fatigue testing. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. 01; 1998. West Conshohocken, PA.
- [8] H. Badnava, S.M.Pezeshki, Kh. F. Nejadand, H.R.Farhoudi., Determination of combined hardening material parameters under strain controlled cyclic loading by using the genetic algorithm method, *Journal of mechanical science and technology* 26 (2012), 3067-3072.
- [9] ABAQUS Analysis User's Manual v6.6-1, Models for metals subjected to cyclic loading, Sect. 18.2.2(2006).
- [10] EN AW-5754 H22 alüminyum alaşımasının kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri, Wilson. (2017). http://www.wilsonsmetals.com/datasheets/Aluminium-Alloy-5754-H22-Sheet-and-Plate_153.ashx (ulaşım Temmuz 25, 2017)
- [11] P. Kelly, Solid Mechanics Part II Lecture notes, University of Auckland, 2008.
- [12] E. Arslan, W. Mack, M. Zigo, G. Kepplinger, Determination of material parameters from imperfect cyclic plasticity test data: *88th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics*, GAMM, Weimar, Almanya, 2017 (basımda).